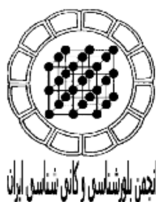
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۸، از صفحهٔ ۱۶۷ تا ۱۷۸



تفاوت ترکیب کلینوپیروکسن در ماگماهای قلیایی و آهکی-قلیایی: بررسی موردی از توده پیرانشهر، شمال غرب ایران

سید علی مظهری*

دانشگاه پیام نور، گروه علمی زمین شناسی، تهران ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۱/۱۴، نسخه نهایی: ۹۷/۴/۲۰)

چکیده: در این پژوهش، ترکیب کلینوپیروکسن در دو نوع گابروی قلیایی و آهکی-قلیایی در توده پیرانشهر مورد بررسی شده است. گستره تغییرات اکسیدهای اصلی در کلینوپیروکسن‌های هر دو نوع گابرو مشابه است و همه آنها در رده دیوپسید- اوژیت رده‌بندی می‌شوند، اما ترکیب عناصر کمیاب در این دو گروه بسیار متفاوت است. کلینوپیروکسن در گابروهای قلیایی غنی از عناصر با شدت میدان یونی بالا (HFSE) و عناصر خاکی نادر (ΣREE = ۳۴ -۶۴ ppm) بوده و نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ در آن پایین است. از سوی دیگر، کلینوپیروکسن‌های نمونه‌های آهکی-قلیایی غنی از Sr، Rb و Ba و فقیر از عناصر HFSE و عناصر خاکی نادر (ΣREE = ۹٫۴ - ۲۶٫۱ ppm) با نسبت‌های بالاتر $^{87}Sr/^{86}Sr$ هستند. محاسبه مذاب در حال تعادل با ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از ضرایب جدایش بین کلینوپیروکسن و ماگمای بازالتی نیز بیانگر ماهیت متفاوت منابع تشکیل آنهاست که با داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌کل گابروها همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: *کلینوپیروکسن؛ گابرو؛ عناصر کمیاب؛ قلیایی؛ آهکی قلیایی؛ توده پیرانشهر؛ پهنه سنندج- سیرجان.*

مقدمه

تغییر نوع و ماهیت ماگما بر بافت و ترکیب کانی‌ها تأثیر مستقیم دارد و بنابراین کانی‌ها می‌توانند اطلاعات با ارزشی از فرایندهای ماگمایی را در خود حفظ کنند [۱-۳]. با پیشرفت تجهیزات آزمایشگاهی و به ویژه تجزیه نقطه‌ای، طیف گسترده‌ای از کانی‌ها، از جمله فرومنیزین [۲-۴] و فلسی [۱، ۵، ۶]، در بررسی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌ساختی‌ماگمایی استفاده شده‌اند. در این میان، کلینوپیروکسن اهمیت ویژه‌ای در تعیین محیط زمین‌دینامیکی داشته است [۲-۴]. این کانی در انواع مختلف ماگماها حضور دارد و ترکیب آن به ماهیت و جایگاه زمین‌ساختی ماگمای اولیه حساس است [۴]. کلینوپیروکسن در برابر تغییرات ناشی از دگرگونی درجه پایین مقاوم است [۷] و رابطه بین ترکیب کلینوپیروکسن و ماگمای میزبان در بسیاری از نقاط دنیا و در محیطهای زمین‌ساختی ماگمایی متفاوت، به اثبات رسیده است [۲، ۳، ۸، ۹]. بنابراین، این کانی قابلیت استفاده به عنوان شاخص سنگ‌زایی، حتی در نمونه‌های دگرسان شده را نیز داراست و تعیین ترکیب آن (شامل اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب) کمکی مؤثر برای تحلیل فرایندهای زمین شناسی خواهد بود.

توده پیرانشهر یکی از توده‌های نفوذی متعددی است که در شمال غربی پهنه سنندج- سیرجان رخنمون یافته است. بررسی‌های دقیق سن‌سنجی و زمین‌شیمیایی بر این توده وجود دو نوع ماگمای مافیک قلیایی و آهکی قلیایی در این مجموعه را به اثبات رسانده است [۱۰]. در این پژوهش، ترکیب کلیوپیروکسن‌های سنگ‌های مختلف مافیک توده پیرانشهر تعیین شده و تأثیر ماگمای میزبان بر این کانی بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شود. بدین منظور، نتایج تجزیه نقطه‌ای اکسیدهای اصلی به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) و عناصر کمیاب

*نویسنده مسئول، تلفن: ۴۴۶۴۴۰۱۲-۰۵۱، نمابر: ۴۴۶۴۱۷۸۸-۰۵۱، پست الکترونیکی: ali54894@yahoo.com

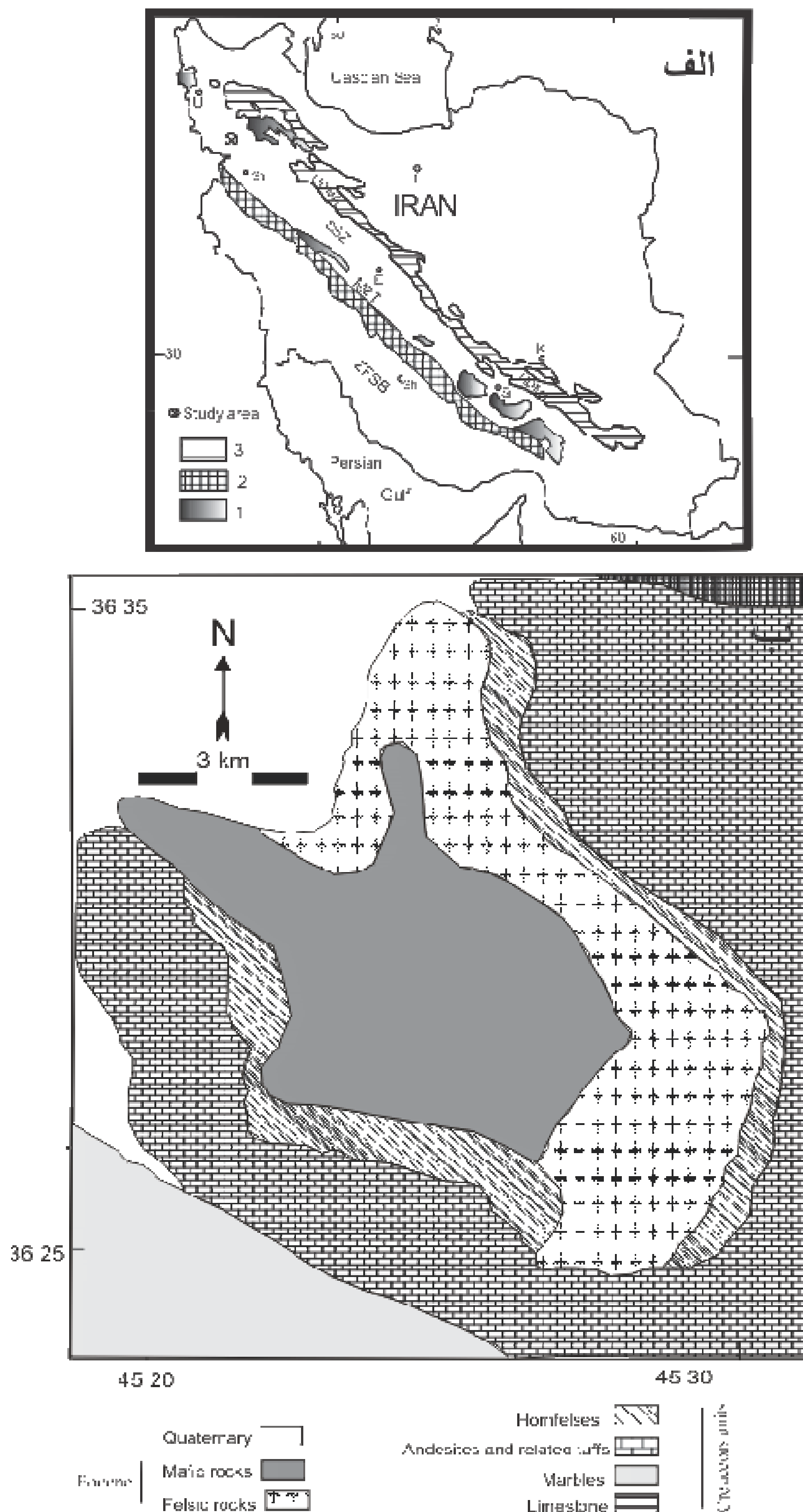
[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]

به روش طیف‌سنجی جرمی سایش لیزری پلاسمای جفت القایی (LA-ICP-MS) ارائه شده و پیرامون روابط بین عناصر مختلف و ماگمای اولیه بحث می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مناطق مشابه و بویژه برای تعیین خاستگاه سنگ‌های انباشتی پیروکسن‌دار که تعیین نوع ماگمای آنها از طریق داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌کل امکان‌پذیر نیست، به کار گرفته شود.

جایگاه زمین‌شناسی

توده پیرانشهر در شمال غربی پهنه سنندج- سیرجان و در مختصات ´۲۰ °۴۵ تا ´۳۰ °۴۵ طول جغرافیایی شرقی و ´۲۵ °۳۶ تا ´۳۵ °۳۶ عرض جغرافیایی شمالی واقع است. پهنه سنندج- سیرجان یکی از واحدهای زمین‌ساختی ماگمایی ایران است که با گسترش طولی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۲۵۰- ۱۵۰ کیلومتر از شمال غربی تا جنوب شرقی ایران امتداد یافته است (شکل ۱ الف). در این پهنه و به ویژه در نیمه شمالی آن، مجموعه نفوذی‌های فراوانی ظاهر شده‌اند که در گستره زمانی وسیع شامل پالئوزوئیک [۱۱]، مزوزوئیک [۱۲، ۱۳] و سنوزوئیک [۱۰، ۱۴] تشکیل شده‌اند. توده نفوذی پیرانشهر یکی از مجموعه سنگ‌های نفوذی است که در ائوسن و طی برخورد صفحات ایران و عربستان و بسته شدن نئوتتیس شکل گرفته است [۱۰]. این توده به شکل بیضوی نامنظم با عرضی حدود ۱۰ و طول ۱۶ کیلومتر در یک روند اصلی S۳۰E رخنمون یافته است (شکل ۱ ب). سنگ‌های آهکی و سنگ‌های رسوبی دگرگون شده مزوزوئیک سنگ‌های میزبان این توده هستند که بر اثر گرمای توده دستخوش دگرگونی مجاورتی شده‌اند، به طوریکه ضخامت هورنفلس‌ها در برخی مناطق به یک کیلومتر نیز می‌رسد. در این توده، ماگماهای کاملاً متمایز فلسی و مافیک که دارای خاستگاه متفاوت هستند، حضور دارند. تعیین سن به روش پرتوسنجی گستره یکسانی را (حدود ۴۱ میلیون سال پیش) برای تشکیل آنها پیشنهاد می‌دهد [۱۰]. سنگ‌های مافیک گابروهایی هستند که بیشتر در مرکز و غرب توده جای گرفته‌اند، در حالیکه سنگ‌های فلسی بیشتر ترکیب سینیتی دارند و در شمال، شرق و در جنوب توده واقع شده‌اند. در شمال توده گابروها به صورت یک زائده (apophysis) با روند شمالی-جنوبی در سینیت‌ها نفوذ کرده‌اند (شکل ۱ ب). در سمت غربی زائده سینیت‌ها دارای کوارتز مودال می‌شوند و در برخی مناطق گرانیت قلیایی ظاهر می‌گردد، اما در شرق زائده، مقدار کوارتز در سینیت‌ها کم شده و رخنمون‌هایی از نفلین سینیت هیپرسولوس روشن دیده می‌شود. معمولا مرز بین سنگ‌های فلسی و مافیک مشخص است، به جز در زائده که شواهد آلایش ماگمای گابرویی با سینیت‌ها دیده می‌شود و سینیت‌ها دارای درونبوم‌های بزرگ گابرویی هستند [۱۰].

چنان که اشاره شد، بررسی‌های دقیق زمین‌شیمیایی بر سنگ‌های این مجموعه نفوذی انجام گرفته است [۱۰]. سنگ‌های فلسی سیینیت، نفلین سیینیت و گرانیت‌های متاآلومین نوع A-2 هستند که درشت بلور، هیپرسولوس و دارای آنیت- فایالیت- هدنبرژیت هستند. سیینیت‌ها، نفلین سیینتی‌ها و گرانیت‌ها خاستگاه مشترک دارند. نفلین سینیت‌ها بازمانده غنی از آب و قلیایی از ماگمایی هستند که یک فاز غنی از فلوئور پیشتر از آن جدا شده است. گرانیت‌ها در یک محیط شیمیایی باز تشکیل شده‌اند، به طوریکه سیال قلیایی غنی از فلوئور و آبدار آزادشده از سینیت‌ها با سنگ‌های فلسی قدیمی واکنش داده است [۱۰]. داده‌های سنگ‌شناسی بیانگر وجود دو نوع ماگمای مافیک در توده پیرانشهر هستند؛ نوع غالب گابروهای قلیایی (G1) هستند که نسبت‌های عناصر سنگ دوست بزرگ یون به عناصر با شدت یونی بالا (LILE/HFSE) شبیه به ماگماهای گوشته‌ای درون صفحه‌ای دارند. نوع دوم گابروهای با روند آهکی قلیایی (G2) با مشخصه‌های ماگماهای قوسی هستند که ویژگی‌های ایزوتوپی نمایانگر خاستگاه غنی شده‌تر آنها نسبت به نوع G1 است [۱۰]. جایگاه برخوردی در محیط تشکیل توده پیرانشهر موجب ایجاد ماگماهای مختلف با منابع متفاوت شده است. ماگمای قلیایی از یک خاستگاه گوشته کمتر دگرگون شده و نوع آهکی قلیایی از واکنش‌های دگرسانی در گوشته بالای مناطق فرورانش شکل گرفته است [۱۰]. در این پژوهش، تمرکز بر نمونه‌های مافیک و بررسی ترکیب کلینوپیروکسن‌های دو نوع گابروی G1 و G2 است.



شکل۱ الف) جایگاه منطقه مورد بررسی در ایران و پهنه سنندج- سیرجان (برگرفته از مرجع [۱۵]). ۱ = نواحی پرکامبرین، ۲ = پهنه روراندگی زاگرس، ۳ = مجموعه ماگمایی ارومیه دختر. E = اصفهان، K = کرمان، MTZ = روراندگی اصلی زاگرس، Sa = سنندج، SSZ = پهنه سنندج- سیرجان، T = تهران، U = ارومیه و ZFSB = کمربند چین خورده ساده زاگرس. ب) نقشه ساده توده پیرانشهر [۱۰].

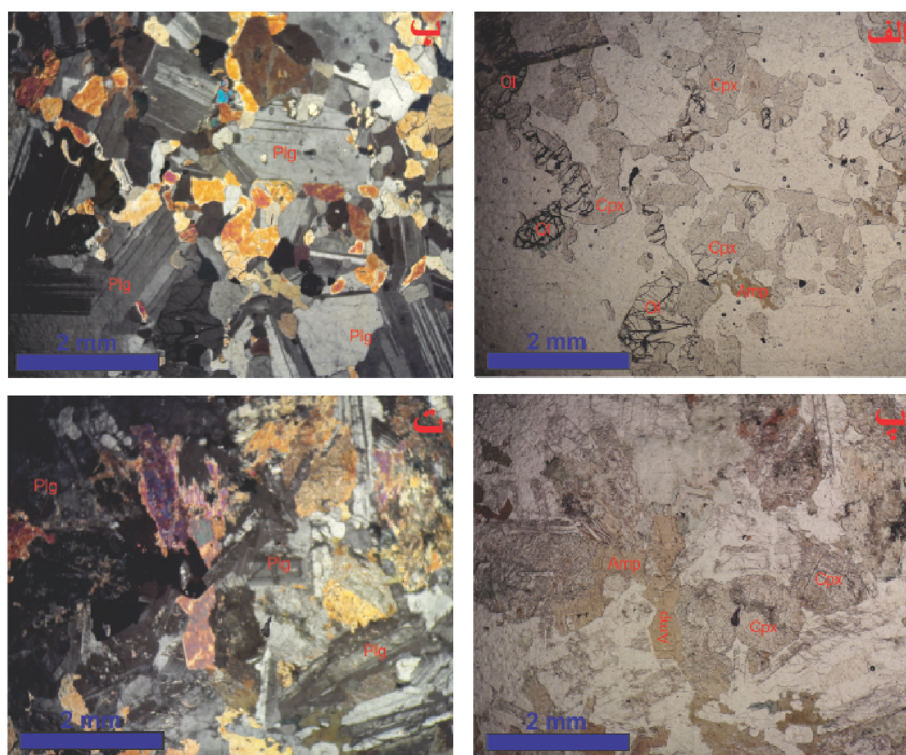
[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]

سنگ‌نگاری

سنگ‌های مافیک گابروهایی متراکم با اندازه دانههای متفاوت از ۰٫۵ میلیمتر تا ۲ سانتیمتر (به طور معمول ۳-۱ =Ø میلی‌متر) هستند. پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و در مرحله بعد آمفیبول فراوانترین کانی‌های هر دو نوع گابرو هستند (شکل ۲). الیوین در همه نمونه‌های گابروی G1 وجود دارد و حجم آن تا ۱۰ درصد مودال نیز ممکن است برسد (شکل‌های ۲ الف و ب)؛ در حالیکه در نمونه‌های G2 الیوین به ندرت و آنهم به شکل کاملاً ایدینگزیتی شده ظاهر می‌شود. کانی‌های فرعی گابروهای پیرانشهر شامل ایلمنیت، تیتانومگنتیت، پیریت، آپاتیت و مقادیر بسیار کم زیرکن هستند. پلاژیوکلاز به گونه‌های مختلف شکل‌دار تا بی شکل با هسته لابرادوریتی ($An_{۴۵-۶۰}$) و لبه آندزینی ($An_{۳۵-۴۵}$) دیده می‌شود. ترکیب پلاژیوکلازها در انواع قلیایی و آهکی قلیایی تقریبا مشابه است [۱۶]. آمفیبول در گابروهای پیرانشهر به رنگ قهوه‌ای و با ترکیب پارگاسیت تا کرسوتیت ظاهر می‌شود. آمفیبول در گابروهای G1 تیتانیوم بیشتری نسبت به نوع G2 دارد [۱۶] و اغلب به صورت درشت بلورهایی دیده می‌شود که کانی‌های پلاژیوکلاز، الیوین و کلینوپیروکسن را دربر می‌گیرد. در گابروهای G2 آمفیبول بیشتر به صورت بلورهای بین دانه‌ای کوچک یا به شکل جانشین کلینوپیروکسن حضور دارد (شکل‌های ۲ پ و ت). کلینوپیروکسن در همه نمونه‌ها به شکل بلورهای بی‌شکل بی-رنگ تا صورتی کمرنگ دیده می‌شود که به طور موضعی ممکن است به بیوتیت یا آمفیبول تبدیل شده باشد. ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در بخش‌های بعدی به تفضیل بررسی می‌شود.

تجزیه بلورهای کلینوپیروکسن

برای انجام این تحقیق مقاطع نازک صیقلی تهیه شده از دو نمونه گابروی قلیایی (N63 و N26) و دو نمونه گابروی آهکی قلیایی (N61 و N31)، به منظور تعیین اکسیدهای اصلی (به روش EPMA) و عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوپی (با استفاده از LA-ICP-MS) در بلورهای کلینوپیروکسن، تجزیه شدند. داده‌های زمین‌شیمیایی این نمونه‌ها (شامل اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب، ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd و تعیین سن U-Th-Pb)، وابستگی این نمونه‌ها به دو گروه مختلف G1 و G2 را تأیید می‌کند [۱۰]. آنالیز EPMA در سال ۲۰۰۷ و در دانشگاه گرانادا با استفاده از دستگاه ریزپردازشگرالکترونی CAMECA SX100 با ولتاژ شتابنده ۲۰ kV و جریان پرتو ۲۰ nA انجام گرفته است.



شکل۲ تصاویری از بافت میکروسکوپی گابروهای پسوه: الف و ب) گابروی قلیایی به ترتیب در نور PPL نور XPL؛ پ و ت) گابروی آهکی قلیایی به ترتیب در نور PPL و نور XPL. (Cpx = کلینوپیروکسن؛ Amp = آمفیبول؛ Ol = الیوین؛ Plg = پلاژیوکلاز).

داده‌های عناصر کمیاب و نسبت‌های ایزوتوپی در سال ۲۰۱۷ و در آزمایشگاه Actlabs کانادا تعیین شد. عناصر کمیاب پیروکسن‌ها در مقاطع نازک صیقلی با استفاده از لیزر ۲۱۳ نانومتر New Wave Research که به دستگاه Thermo Finnigan-High Resolution ICP-MS متصل بود، تعیین شدند. بلورها با استفاده از یک نقطه به قطر ۷۵ μm با انرژی ۰٫۰۷ mJ در ۱۰ Hz تجزیه شدند. ترکیب ایزوتوپی Sr بر کلینوپیروکسن بلورهای مقاطع نازک صیقلی به روش MC-ICP-MS با استفاده از دستگاه Neptune Multi Collector ICP-MS تعیین شد. این کار براساس دستورالعمل مرجع [۲] انجام گرفت.

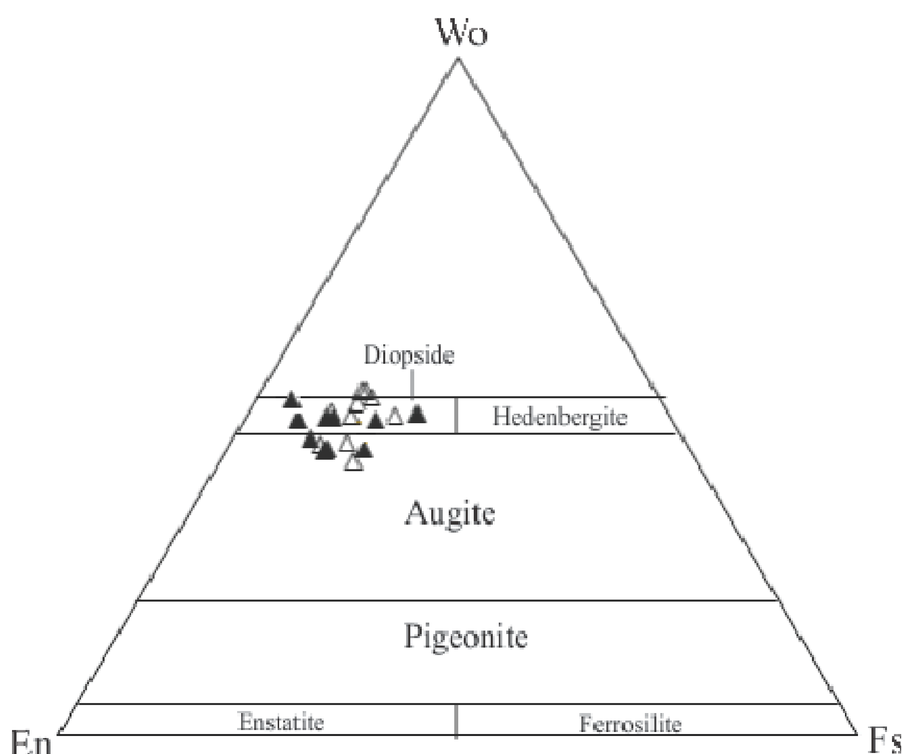
شیمی کانی

ترکیب اکسیدهای اصلی کلینوپیروکسن‌های گابروهای توده پیرانشهر در جدول ۱ ارائه شده است. تغییرات فراوانی اکسیدهای اصلی در بلورهای کلینوپیروکسن گابروهای G1 و G2 مشابه است و همه آنها در گستره دیوپسید- اوژیت ($En_{37-51}Fs_{10-21}Wo_{32-51}$) رده‌بندی می‌شوند (شکل ۳).

جدول۱ ترکیب اکسیدهای اصلی (برحسب درصد وزنی) نمونه‌های برگزیده کلینوپیروکسن در گابروهای پیرانشهر. CA= گابروی آهکی قلیایی؛ A= گابروی قلیایی.

شماره نمونه	N26	N26	N31	N31	N31	N61	N61	N63	N63	N63
نوع سنگ	A	A	CA	CA	CA	CA	CA	A	A	A
SiO_2	۵۲٫۷	۵۱٫۹۰	۵۱٫۱۸	۵۲٫۳۱	۵۱٫۸۹	۵۱٫۷۳	۵۲٫۱۶	۵۲٫۲۴	۵۲٫۲۹	۵۲٫۶۴
TiO_2	۰٫۵۸	۰٫۶۷	۱٫۱۰	۰٫۵۴	۰٫۶۴	۰٫۷۵	۰٫۵۱	۰٫۵۸	۰٫۴۷	۰٫۴۳
Al_2O_3	۱٫۹۹	۲٫۹۴	۲٫۵۲	۲٫۱۳	۲٫۴۲	۱٫۸۳	۱٫۴۳	۱٫۳۸	۱٫۶۶	۱٫۲۶
Cr_2O_3	۰٫۱۰	۰٫۲۶	۰٫۰۶	۰٫۱۹	۰٫۳۱	۰٫۰۹	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۱
NiO	۰٫۰۸	۰	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۶	۰	۰
FeO	۶٫۳۳	۱۰٫۳۵	۸٫۷۸	۹٫۲۹	۸٫۲۸	۱۰٫۹۶	۱۰٫۸۳	۱۰٫۸۰	۱۰٫۴۴	۱۱٫۰۵
MnO	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۰	۰٫۳۷	۰٫۳۶	۰٫۳۹	۰٫۳۲	۰٫۳۷
MgO	۱۶٫۰۶	۱۷٫۹۹	۱۴٫۱۱	۱۵٫۵۶	۱۴٫۴۲	۱۲٫۷۶	۱۲٫۸۳	۱۲٫۹۵	۱۲٫۹۶	۱۳٫۰۵
CaO	۲۲٫۱۸	۱۶٫۴۸	۲۱٫۶۸	۱۹٫۹۲	۲۱٫۷۵	۲۱٫۷۸	۲۱٫۷۹	۲۱٫۶۱	۱۲٫۸۴	۲۱٫۶۴
Na2O	۰٫۳۲	۰٫۳۱	۰٫۴۱	۰٫۳۳	۰٫۴۴	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۰٫۳۶	۰٫۴۱	۰٫۳۷
K2O	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲
F	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۰	۰٫۱۲
Cl	۰	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۱	۰	۰
مجموع	۱۰۰٫۷۰	۱۰۱٫۳۲	۱۰۰٫۲۸	۱۰۰٫۶۳	۱۰۰٫۵۵	۱۰۰٫۷۶	۱۰۰٫۴۸	۱۰۰٫۵۲	۱۰۰٫۵۰	۱۰۰٫۹۷
فرمول(6O)										
Si	۱٫۹۳	۱٫۸۹	۱٫۹۰	۱٫۹۳	۱٫۹۲	۱٫۹۳	۱٫۹۵	۱٫۹۵	۱٫۹۵	۱٫۹۶
Ti	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Al	۰٫۰۹	۰٫۱۳	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۶
Cr	۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰	۰	۰	۰	۰
Ni	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe_t	۰٫۱۹	۰٫۳۱	۰٫۲۷	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۳۳	۰٫۳۴
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۸۸	۰٫۹۷	۰٫۷۸	۰٫۸۵	۰٫۷۹	۰٫۷۱	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۰٫۷۲
Ca	۰٫۸۷	۰٫۶۴	۰٫۸۶	۰٫۷۹	۰٫۸۶	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۶
Na	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳
K	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
F	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Cl	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe3	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴
Fe2	۰٫۱۳	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۰٫۲۳	۰٫۱۹	۰٫۲۹	۰٫۲۹	۰٫۳۰	۰٫۲۹	۰٫۳۰
En	۰٫۴۵	۰٫۵۰	۰٫۴۱	۰٫۴۴	۰٫۴۲	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۰٫۳۸
Wo	۰٫۴۵	۰٫۳۳	۰٫۴۵	۰٫۴۱	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵
Fs	۰٫۱۰	۰٫۱۶	۰٫۱۴	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۱۷	۰٫۱۸

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]



شکل۳ نمایش ترکیب کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر در نمودار رده بندی پیروکسن‌ها [۱۷]. ▲= کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای قلیـایی؛ Δ= کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای آهکی قلیایی.

مقدار عناصر کمیاب کلینوپیروکسن‌ها (جدول ۲) روندی کاملاً متفاوت با اکسیدهای اصلی را نشان می‌دهد. کلینوپیروکسن‌های گابروهای قلیایی در بسیاری از عناصر اختلاف ترکیبی بارزی با انواع آهکی قلیایی نشان می‌دهند. تمرکز عناصر LILE (Rb ،Sr و Ba) درکلینوپیروکسن‌های گابروهای G2 بالاتر از نمونه‌های G1 است؛ حال‌آن‌که کلینوپیروکسن‌های G1 به نسبت G2 از عناصر HFSE (Sc، V، Ga، Y، Nb، Ta، Zr، Hf، Th و REE) غنی شده‌اند (شکل ۴). تفاوت ترکیب کلینوپیروکسن در انواع گابروهای پیرانشهر در الگوی نمودار عنکبوتی بهنجارشده نسبت به کندریت اولیه به خوبی نمایان است (شکل ۵ الف). در الگوی نمودار عناصر نادر خاکی (REE) نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین کلینوپیروکسن‌های گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی دیده می‌شود (شکل ۵ ب). با وجود اینکه روند الگوی REE در کلینوپیروکسن‌های G1 (La_N/Yb_N = ۰/۳۵ -۰/۴۴) و G2 (۰/۳۸- ۰/۳۰ = La_N/Yb_N) تقریبا مشابه است، مقدار عناصر خاکی نادر در کلینوپیروکسن‌های قلیایی (ΣREE = ۳۴ -۶۴ ppm) به مراتب بیشتر از نمونه‌های آهکی قلیایی (ΣREE = ۹٫۴ -۲۶٫۱ ppm) است. افزون بر این، ناهنجاری منفی Eu در کلینوپیروکسن‌های G1 مشهود است (Eu/Eu^* = ۰٫۶۳ -۰٫۷۷)؛ درحالیکه انواع G2 نابهنجاری Eu ندارند (۱- ۰٫۹۲= Eu/Eu^*).

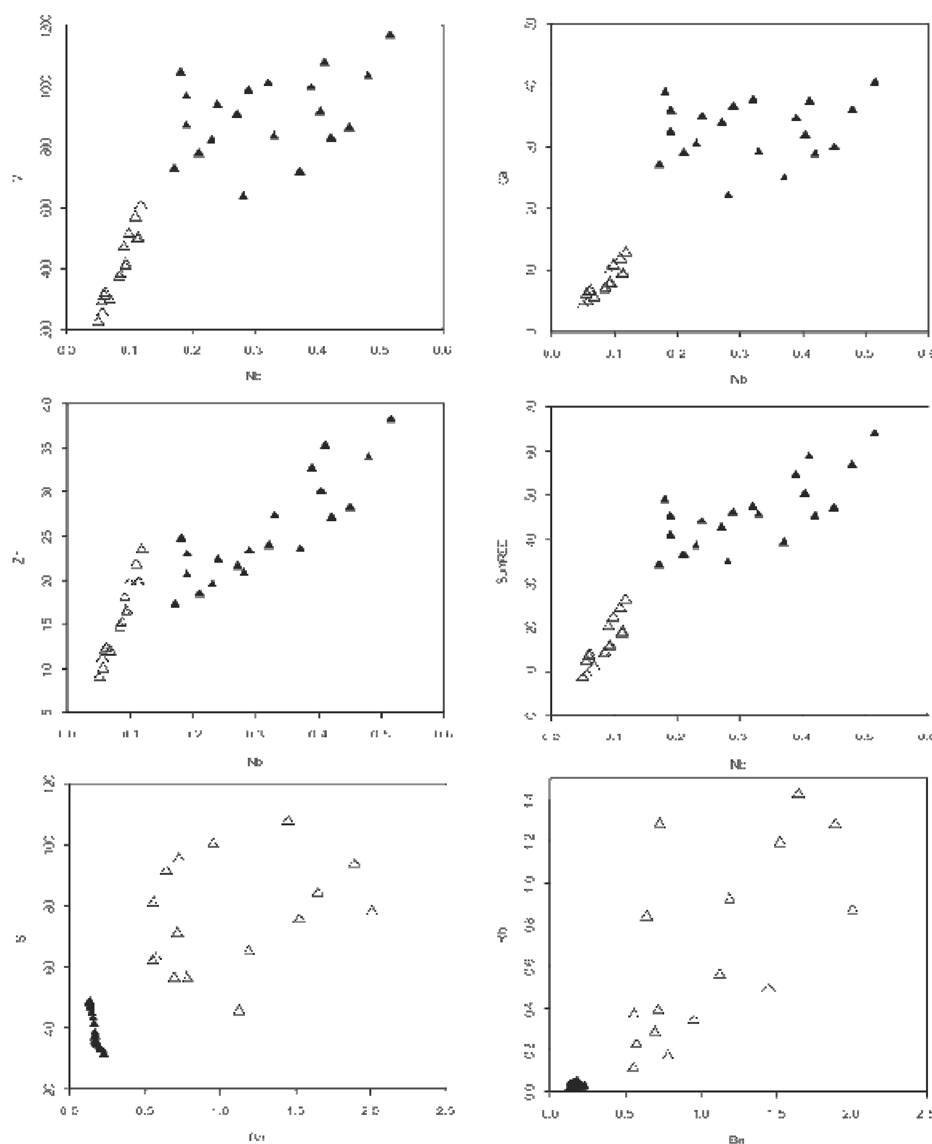
نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}Sr/^{86}Sr$ اندازه‌گیری شده برای کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر در جدول۳ آورده شده است. گفتنی است که تجهیزات مورد استفاده برای اندازه گیری نسبت‌های ایزوتوپی در این پژوهش تنها قادر به تعیین مقدار نسبت‌های ایزوتوپی Sr بوده و متاسفانه برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی Rb مناسب نبودند. بنابراین، مقادیر ارائه شده در اینجا بدون تصحیحات سنی بوده و در واقع مقدار کمّی و واقعی نسبت‌های ایزوتوپی در نمونه‌های گابرو را نشان نمی‌دهند. با این حال، از این داده‌ها می‌توان برای مقایسه نسبت‌های ایزوتوپی بین کلینوپیروکسنهای شکل گرفته از ماگماهای مادر متفاوت استفاده نمود [۲]. چنان که در جدول ۳ آورده شده است، نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ در کلینوپیروکسن‌های G2

(۰٫۷۰۷۴۸- ۰٫۷۰۷۱۳) بالاتر از کلینوپیروکسن‌های G1 (۰٫۷۰۶۱۲- ۰٫۷۰۵۴۳) است. این مقادیر بیانگر ماهیت پرتوزاد خاستگاه نمونه‌های آهکی-قلیایی است که با روند مشاهده شده برای نسبت‌های ایزوتوپی سنگ‌کل برای گابروهای پیرانشهر همخوانی دارد، چرا که نمونه‌های سنگ‌کل گابروهای G2 نیز دارای نسبت‌های $^{87}Sr/^{86}Sr$ بالاتری از نمونه‌های G1 هستند [۱۰].

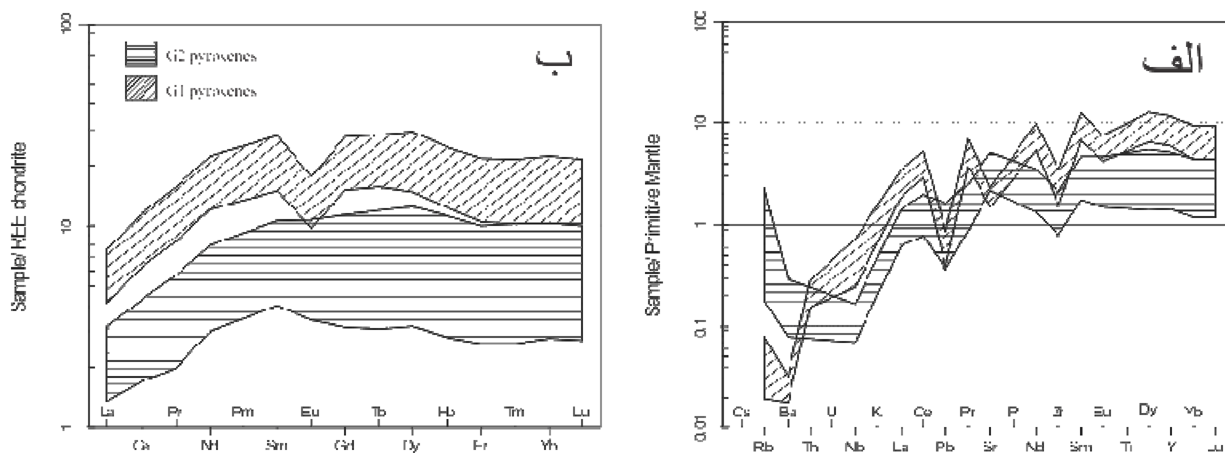
جدول۲ ترکیب عناصر کمیاب (برحسب ppm) کلینوپیروکسن در گابروهای پیرانشهر. (CA = گابروی آهکی قلیایی؛ A = گابروی قلیایی. b.d. = پایین تر از حد تشخیص.

شماره نمونه	N26	N26	N26	N63	N63	N63	N31	N31	N31	N61	N61	N61
نوع سنگ	A	A	A	A	A	A	CA	CA	CA	CA	CA	CA
Rb	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۰٫۳۹	۰٫۳۷	۰٫۸۷	۰٫۴۹	۰٫۹۲
Sr	۴۸٫۵۵	۴۵٫۱۵	۳۱٫۱۸	۴۱٫۱۹	۳۸٫۴۶	۳۵٫۵۰	۵۶٫۳۹	۷۰٫۸۶	۸۰٫۸۷	۷۸٫۰۹	۱۰۷٫۸۰	۶۵٫۲۵
Ba	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۲۳	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۷۸	۰٫۷۱	۰٫۵۵	۲٫۰۱	۱٫۴۵	۱٫۱۹
Sc	۲۵۶٫۹۴	۲۹۰٫۷۱	۴۱۶٫۲۹	۳۲۰٫۸۷	۳۳۱٫۷۲	۳۴۷٫۴۱	۵۴٫۰۹	۴۸٫۷۹	۸۷٫۱۵	۸۰٫۴۵	۱۰۳٫۴۱	۶۶٫۹۱
V	۷۲۷٫۱۷	۸۲۲٫۷۶	۱۱۶۶٫۷۴	۹۰۸٫۱۱	۹۳۸٫۸۳	۹۸۳٫۲۱	۳۱۸٫۳۸	۲۸۷٫۱۷	۵۱۲٫۹۷	۴۹۹٫۷۵	۶۰۸٫۶۷	۴۱۵٫۶۷
Ga	۲۶٫۹۴	۳۰٫۴۹	۴۰٫۴۰	۳۳٫۶۵	۳۴٫۴۹	۳۶٫۴۳	۶٫۶۱	۵٫۹۶	۱۰٫۶۴	۹٫۲۵	۱۲٫۶۳	۷٫۶۹
Y	۲۶٫۵۱	۲۹٫۹۹	۵۲٫۲۵	۳۳٫۱۱	۳۴٫۲۳	۳۵٫۸۴	۱۲٫۳۴	۱۱٫۱۳	۱۹٫۸۷	۱۴٫۳۴	۲۳٫۵۸	۱۱٫۳۹
Nb	۰٫۱۷	۰٫۲۳	۰٫۵۱	۰٫۲۷	۰٫۲۴	۰٫۲۹	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۰۹
Ta	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Zr	۱۷٫۲۴	۱۹٫۵۱	۳۸٫۲۹	۲۱٫۵۳	۲۲٫۲۶	۲۳٫۳۱	۱۲٫۲۶	۱۱٫۰۶	۱۹٫۷۵	۱۹٫۹۵	۲۳٫۴۴	۱۶٫۵۹
Hf	۱٫۳۴	۱٫۵۱	۳٫۲۱	۱٫۶۷	۱٫۷۲	۱٫۸۱	۰٫۷۷	۰٫۶۹	۱٫۲۴	۱٫۶۱	۱٫۴۷	۱٫۳۴
Pb	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۱۱	۰٫۰۶	۰٫۱۰
Th	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d	b.d
La	۱٫۴۰	۱٫۵۸	۲٫۳۶	۱٫۷۴	۱٫۸۰	۱٫۸۹	۰٫۵۱	۰٫۴۶	۰٫۸۳	۰٫۹۴	۰٫۹۸	۰٫۷۹
Ce	۵٫۱۶	۵٫۸۴	۹٫۲۸	۶٫۴۵	۶٫۶۶	۶٫۹۸	۱٫۸۲	۱٫۶۴	۲٫۹۳	۳٫۰۶	۳٫۴۷	۲٫۵۵
Pr	۱٫۰۳	۱٫۱۶	۱٫۸۹	۱٫۲۸	۱٫۳۳	۱٫۳۹	۰٫۳۶	۰٫۳۳	۰٫۵۸	۰٫۵۴	۰٫۶۹	۰٫۴۵
Nd	۷٫۲۰	۸٫۱۵	۱۳٫۲۸	۸٫۹۹	۹٫۲۹	۹٫۷۳	۲٫۵۲	۲٫۲۷	۴٫۰۵	۴٫۰۳	۴٫۸۱	۳٫۳۵
Sm	۲٫۹۱	۳٫۲۹	۵٫۴۷	۳٫۶۳	۳٫۷۶	۳٫۹۴	۱٫۰۹	۰٫۹۸	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۲٫۰۸	۱٫۴۶
Eu	۰٫۸۶	۰٫۹۷	۱٫۲۸	۱٫۰۶	۱٫۱۲	۱٫۱۹	۰٫۳۹	۰٫۳۸	۰٫۶۵	۰٫۵۴	۰٫۷۹	۰٫۴۸
Gd	۴٫۰۶	۴٫۵۹	۷٫۱۱	۵٫۰۷	۵٫۲۴	۵٫۴۹	۱٫۵۴	۱٫۳۹	۲٫۴۹	۱٫۸۳	۲٫۹۵	۱٫۵۲
Tb	۰٫۷۴	۰٫۸۴	۱٫۳۵	۰٫۹۲	۰٫۹۵	۱٫۰۰	۰٫۳۰	۰٫۲۷	۰٫۴۸	۰٫۳۳	۰٫۵۷	۰٫۲۷
Dy	۴٫۷۶	۵٫۳۸	۹٫۳۷	۵٫۹۴	۶٫۱۴	۶٫۴۳	۲٫۱۱	۱٫۹۱	۳٫۴۰	۲٫۳۰	۴٫۰۴	۱٫۹۲
Ho	۰٫۸۹	۱٫۰۰	۱٫۷۷	۱٫۱۱	۱٫۱۴	۱٫۲۰	۰٫۴۲	۰٫۳۸	۰٫۶۸	۰٫۴۵	۰٫۸۱	۰٫۳۸
Er	۲٫۲۰	۲٫۴۸	۴٫۵۴	۲٫۷۴	۲٫۸۴	۲٫۹۷	۱٫۱۰	۰٫۹۹	۱٫۷۸	۱٫۲۳	۲٫۱۱	۱٫۰۳
Tm	۰٫۳۳	۰٫۳۷	۰٫۶۹	۰٫۴۱	۰٫۴۳	۰٫۴۵	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۲۸	۰٫۱۹	۰٫۳۳	۰٫۱۶
Yb	۲٫۱۵	۲٫۴۳	۴٫۶۰	۲٫۶۹	۲٫۷۸	۲٫۹۱	۱٫۱۴	۱٫۰۳	۱٫۸۳	۱٫۳۰	۲٫۱۸	۱٫۰۸
Lu	۰٫۳۳	۰٫۳۷	۰٫۶۹	۰٫۴۱	۰٫۴۳	۰٫۴۵	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۲۷	۰٫۲۰	۰٫۳۲	۰٫۱۶
Σ REE	۳۴٫۰۳	۳۸٫۵۰	۶۳٫۷۴	۴۲٫۴۹	۴۳٫۹۳	۴۶٫۰۱	۱۳٫۶۶	۱۲٫۳۲	۲۲٫۰۱	۱۸٫۷۲	۲۶٫۱۲	۱۵٫۵۷

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]



شکل۴ نمودارهای دوتایی بیانگر تفاوت ترکیب عناصر کمیاب در کلینوپیروکسنهای گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی توده پیرانشهر. علائم همانند شکل۳ است.



شکل۵ الف) نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه ب) الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت برای کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای پسوه. مقادیر بهنجار شده برگرفته از مرجع [۱۸] هستند.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]

جدول۳ ترکیب ایزوتوپ‌های Sr کلینوپیروکسن‌های گابروهای پیرانشهر.

شماره نمونه	نوع سنگ	^{84}Sr	^{86}Sr	^{87}Sr	^{88}Sr	$^{87}Sr/^{86}Sr$	1σ	$^{84}Sr/^{86}Sr$	1σ
N26	A	۰٫۰۴۱۴۵	۰٫۵۶۳۴۱	۰٫۴۸۰۸۲	۴٫۱۴۳۵۲	۰٫۷۰۵۴۸	۰٫۰۰۰۰۴	۰٫۰۵۶۵۵	۰٫۰۰۰۰۶
N26	A	۰٫۰۰۳۴۷	۰٫۰۶۴۲۷	۰٫۰۵۶۶۸	۰٫۷۴۴۲۶	۰٫۷۰۵۴۳	۰٫۰۰۰۱۱	۰٫۰۶۱۷۱	۰٫۰۰۰۴۲
N26	A	۰٫۰۱۴۳۵	۰٫۲۶۳۰۷	۰٫۲۵۴۱۹	۲٫۲۷۸۶۴	۰٫۷۰۶۰۹	۰٫۰۰۰۰۸	۰٫۰۵۷۲۶	۰٫۰۰۰۲۱
N63	A	۰٫۰۰۳۳۱	۰٫۰۴۹۲۶	۰٫۰۴۴۹۹	۰٫۴۲۷۱۹	۰٫۷۰۶۱۳	۰٫۰۰۰۲۰	۰٫۰۷۱۹۷	۰٫۰۰۰۷۸
N63	A	۰٫۰۱۰۵۵	۰٫۱۸۷۳۵	۰٫۱۷۸۵۱	۲٫۶۲۳۸۴	۰٫۷۰۶۰۶	۰٫۰۰۰۰۹	۰٫۰۵۹۱۹	۰٫۰۰۰۵۰
N63	A	۰٫۰۰۳۸۱	۰٫۰۶۳۳۴	۰٫۰۸۴۴۹	۰٫۵۴۷۲۹	۰٫۷۰۵۷۸	۰٫۰۰۰۱۸	۰٫۰۶۰۹۴	۰٫۰۰۰۳۶
N31	CA	۰٫۰۲۲۱۷	۰٫۳۸۸۷۴	۰٫۳۶۲۴۱	۳٫۳۸۲۴۹	۰٫۷۰۷۳۹	۰٫۰۰۰۰۵	۰٫۰۵۶۵۰	۰٫۰۰۰۰۷
N31	CA	۰٫۰۱۷۱۸	۰٫۳۰۲۱۳	۰٫۳۰۵۱۲	۲٫۶۱۸۳۴	۰٫۷۰۷۲۸	۰٫۰۰۰۰۶	۰٫۰۵۵۹۴	۰٫۰۰۰۲۱
N31	CA	۰٫۰۰۲۲۳	۰٫۰۳۱۷۳	۰٫۰۲۶۵۹	۰٫۲۶۵۷۸	۰٫۷۰۷۳۳	۰٫۰۰۰۱۵	۰٫۰۷۶۱۳	۰٫۰۰۰۸۳
N61	CA	۰٫۰۱۸۰۵	۰٫۳۲۶۳۸	۰٫۳۴۱۹۲	۲٫۸۳۶۲	۰٫۷۰۷۱۳	۰٫۰۰۰۰۴	۰٫۰۵۷۰۳	۰٫۰۰۰۱۳
N61	CA	۰٫۰۰۵۷۹	۰٫۱۰۸۱۳	۰٫۰۸۲۵۱	۰٫۹۳۷۷۵	۰٫۷۰۷۲۴	۰٫۰۰۰۱۰	۰٫۰۶۳۰۷	۰٫۰۰۰۷۱
N61	CA	۰٫۰۲۲۹۳	۰٫۴۲۳۷۲	۰٫۴۶۵۱۶	۳٫۶۷۱۵۲	۰٫۷۰۷۱۶	٫۰۰۰۰۵	۰٫۰۵۶۰۴	۰٫۰۰۰۶

بحث

در بررسی‌های انجام شده پیرامون ارتباط ترکیب کلینوپیروکسن و ماهیت ماگمای مادر، بر تأثیر نوع ماگما در اکسیدهای اصلی تأکید شده [۲، ۳، ۷] و بر همین اساس نمودارهای مختلفی برای تشخیص انواع ماگماها و محیط‌های زمین‌ساختی مختلف ارائه شده است [۲، ۳]. در کلینوپیروکسن‌های انواع گابروهای توده پیرانشهر تفاوت چندانی در ترکیب اکسیدهای اصلی دیده نمی‌شود (جدول ۱ و شکل ۳). نبود تفاوت در ترکیب اکسیدهای اصلیِ کلینوپیروکسن‌های توده پیرانشهر درنگاه نخست ممکن است تفاوت ماهیت ترکیب ماگمای اولیه را رد کند، اما پژوهش‌های اخیر پیرامون جایگاه‌های برخوردی و قوسی، وجود ماگماهای مختلف و هم‌سن در این مناطق را به اثبات رسانده است [۱۹، ۲۰] و کلینوپیروکسن‌های متبلور شده از ماگماهای مختلف این نواحی اغلب از نظر اکسیدهای اصلی دارای همپوشی قابل توجه هستند [۲۱]. در توده پیرانشهر نیز به این علت ترکیب اکسیدهای اصلی در ماگماهای قلیایی و آهکی قلیایی تقریباً مشابه است.

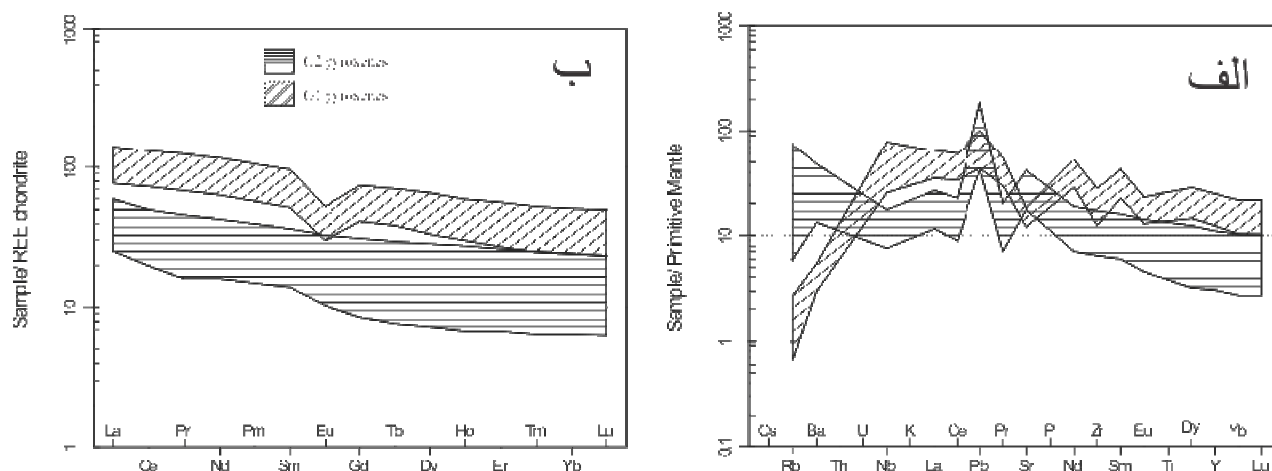
در سوی دیگر، کلینوپیروکسن‌های گابروهای G1 و G2 ترکیب کاملاً متفاوتی از عناصر کمیاب از خود نشان می‌دهند. کلینوپیروکسن‌ها در گابروهای قلیایی نسبت به همتاهای آهکی قلیایی خود از بسیاری از عناصر HFSE و REE غنی شده‌اند؛ در حالیکه فراوانی عناصر LILE چون Rb، Sr و Ba در نمونه-های آهکی قلیایی بیشتر است (شکل‌های ۴ و ۵). چنین تفاوت‌هایی در کلینوپیروکسن‌های ماگماهای قلیایی و آهکی قلیایی سایر نقاط دنیا نیز قابل مشاهده است [۲۲]. در نمونه-های مورد بررسی، فراوانی عناصر کمیاب ماگماهای در حال تعادل با کلینوپیروکسن‌ها از طریق ضرایب جدایش کلینوپیروکسن و ماگمای بازالتی [۲۳] و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$K_d = C_s / C_l$$

در این رابطه، K_d ضریب جدایش، C_s غلظت عنصر مورد نظر در کلینوپیروکسن و C_l غلظت عنصر در ماگمای در حال تعادل است.

در نمودار عنکبوتی بهنجارشده نسبت به کندریت، ماگمای محاسبه شده از ترکیب کلینوپیروکسن‌های G1 به نسبت نمونه‌های G2، از عناصر HFSE غنی‌تر و از عناصر LILE فقیرتر شده‌اند (شکل ۶ الف). ناهنجاری منفی Nb در نمونه-های G2 قابل مشاهده است، درحالیکه در نمونه‌های G1 وجود ندارد و همچنین ناهنجاری مثبت Pb در نمونه‌های G2 بارزتر است (شکل ۶ الف). این ویژگی‌ها از تفاوت‌های بارز ماگماهای آهکی قلیایی مناطق قوسی با ماگماهای قلیایی محسوب می-شود [۲۴]. روند الگوی REE در ترکیب ماگماهای در حال تعادل محاسبه شده از کلینوپیروکسن‌های گابروهای G1 مشابه با نمونه‌های G2 است، با این تفاوت که مجموع عناصر خاکی نادر در انواع قلیایی (میانگین ΣREE =۲۳۴ ppm) بسیار بیشتر از مقادیر ماگمای محاسبه شده آهکی قلیایی (میانگین ΣREE =۸۶ ppm) است (شکل ۶ ب). ناهنجاری منفی یوروپیوم نیز در ماگمای محاسبه شده G1 بارزتر از G2 است که می‌تواند بیانگر تفکیک پلاژیوکلاز طی دگرگونی ماگمای G1 باشد.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]



شکل۶ الف) نمودار عنکبوتی بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه و ب) الگوی REE بهنجار شده نسبت به کندریت(ب) برای مذاب درحال تعادل محاسبه شده از ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن‌های گابروهای پسوه.

بنابراین تفاوت ترکیب عناصر کمیاب در کلینوپیروکسن‌های انواع گابروهای توده پیرانشهر کاملا وابسته به ماهیت ماگمای اولیه تشکیل دهنده این سنگ‌ها بوده است. کلینوپیروکسن‌های G1 پیرو ماگمای مادر قلیایی خود دارای تراکم بالاتری از عناصر HFSE هستند و نسبت پایین‌تر $^{87}Sr/^{86}Sr$ در آنها (جدول۳) نشان‌دهنده کمتر دگرگونه بودن ماگمای اولیه است [۲۵]. از طرف دیگر، کلینوپیروکسن‌های G2 ترکیب بالاتری از Sr، Rb و Ba داشته، نسبت‌های $^{87}Sr/^{86}Sr$ بالاتری دارند و آشکارا از عناصر HFSE تهی‌شدگی نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها نشان از دگرسانی خاستگاه گوشته‌ای به وسیله سیال-های آبدار مشتق شده از فرایندهای آبزدایی ورقه فرورونده و رسوبات دریایی در مناطق فرورانش و ماهیت آهکی قلیایی ماگمای اولیه دارد [۲].

این داده‌ها نشان می‌دهد که تمایز ترکیب ماگمای اولیه در ترکیب عناصر کمیاب کلینوپیروکسن بهتر از اکسیدهای اصلی نمود می‌یابد و می‌تواند به عنوان شاخصی در تعیین ماهیت مبهم ماگماهایی که تعیین آنها از طریق روش‌های متداول زمین‌شیمیایی مقدور نیست، به کار رود. البته برای استفاده از این شاخص باید همه ویژگی‌های زمین‌دینامیکی و سنگ-شناسی را نیز در نظر گرفت چرا که ترکیب ماگماها در شرایط محیطی متفاوت کاملاً متفاوت است و حتی بر ضرایب جدایش کانی/ مذاب نیز تأثیر می‌گذارد [۲۶].

برداشت

کانی کلینوپیروکسن در گابروهای قلیایی و آهکی قلیایی توده پیرانشهر، باوجود داشتن ترکیب یکسان در اکسیدهای اصلی، از نظر عناصر کمیاب تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دارند. کلینوپیروکسن‌های نمونه‌های قلیایی غنی از عناصر HFSE و REE هستند و نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ در آنها پایین است؛ در حالیکه کلینوپیروکسن‌های گابروهای آهکی قلیایی غنی از Sr، Rb و Ba هستند و مقدار $^{87}Sr/^{86}Sr$ آنها بالاتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بررسی توزیع عناصر کمیاب می‌تواند کمکی به سزا در تعیین ماهیت ماگمای اولیه و بررسی‌های سنگ‌زایی باشد. ترکیب ماگمای محاسبه شده در حال تعادل با کلینوپیروکسن‌ها در ماگماهای قلیایی و آهکی قلیایی متفاوت است که می‌تواند در تشخیص ماهیت سنگ‌های انباشتی (کومولایی) که از طریق شیمی سنگ کل امکان پذیر نیست، به کار رود.

قدردانی

از دو داور محترم مجله که با پیشنهادات ارزشمند خود موجب بالارفتن کیفیت این مقاله شدند، بسیار سپاسگزارم.

مراجع

[1] Hou T., Zhang Z.C., Keiding J.K., Veksler I.V., *"Petrogenesis of the ultrapotassicFanshan intrusion in the North China Craton: implications for lithospheric mantle metasomatism and the*

Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran: A Marker of the End of the Collision in the Zagros Orogen", Journal of the Geological Society, 166 (2009) 53–69.

[11] Bea F., Mazhari A., Montero P., Amini S., Ghalamghash J., *"Zircon dating, Sr and Nd isotopes, and element geochemistry of the Khalifan pluton, NW Iran: evidence for Variscan magmatism in a supposedly Cimmerian superterrane",* Journal of Asian Earth Sciences 40 (2011) 172–179.

[12] Mazhari S.A., Amini S., Ghalamghash J., Bea F., *"Petrogenesis of granitic unit of naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran",* Arabian Journal of Geosciences 4 (2011) 1207–1214.

[13] Yajam S., Montero P., Scarrow J.H., Ghalamghash J., Razavai S.M.H., Bea F., *"The spatial and compositional evolution of the Late Jurassic Ghorveh-Dehgolan plutons of the Zagros Orogen, Iran: SHRIMP zircon U-Pb and Sr and Nd isotope evidence",* Geologica Acta 13 (2015) 25-43.

[14] Azizi H., Hadad S., Stern R.J., Asahara Y., *"Age, geochemistry, and emplacement of the ~40-Ma Baneh granite–appinite complex in a transpressional tectonic regime, Zagros suture zone, northwest Iran",* International Geology Review 4 (2018) 2- 29 doi.org/10.1080/00206814.2017.1422394

[15] Alavi M., *"Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations",* Tectonophysics 229 (1994) 211–238.

[16] Mazhari S.A., *"Petrogenesis of Naqadeh-Sardasht plutons"*, PhD Thesis, Tarbiat Moallem University (2008) 320p.

[17] Morimoto N., *"Nomenclature of pyroxenes",* Canadian Mineralogist 27 (1989) 143-156.

[18] Sun S.S., McDonough W.F., *"Chemical and isotopic systematics of the oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: In: Saunder, A.D., Norry, M.J. (Eds), Magmatism in the Oceanic Basalts",* Geological Society of London. London 42 (1989) 313-345.

[19] Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y., *"Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional origin of apatite ores'*, Journal of Petrology 5 (2015) 893–918.

[2] Liang Y., Deng J., Liu X., Wang Q., Qin C., Li Y., Yang Y., Zhou M., Jiang J., *"Major and trace element, and Sr isotope compositions of clinopyroxene phenocrysts in mafic dykes on Jiaodong Peninsula, southeastern North China Craton: Insights into magma mixing and source metasomatism",* Lithos 302–303 (2018) 480–495.

[3] Ovung T.N., Ray J., Ghosh B., Koeberl C., Topa D., Paul M., *"Clinopyroxene composition of volcanics from the Manipur Ophiolite, Northeastern India: implications to geodynamic setting",* International Journal of Earth Sciences (2017) DOI 10.1007/s00531-017-1529-y.

[4] Leterrier J., Maury RC., Thonon P., Girard D., Marchal M., *"Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of Paleo-volcanic series"*, Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 139–154.

[5] Jacamon F., Larsen R.B., *"Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation",* Lithos 107 (2009) 281–291.

[6] Mazhari S.A., Ghalamghash J., Mazloumi Bajestani A.R., Hajalilou B., *"Application of trace elements composition in quartz for Naqadeh granitoids petrogenesis interpretation, NW Sanandaj-Sirjan Zone",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012) 505-514.

[7] Nisbet E.G., Pearce J.A., *"Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings",* Contribution to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 149–160.

[8] Jankovics M.É., Taracsák Z., Dobosi G., Embey-Isztin A., Batki A., Harangi S., Hauzenberger C.A., *"Clinopyroxene with diverse origins in alkaline basalts from the western Pannonian Basin: implications from trace element characteristics",* Lithos 262 (2016) 120–134.

[9] Ronick R., Renno A.D., *"Clinopyroxene from basaltic rocks of the Erzgebirge-Krusne hory Mts.-implications for modelling the magmatic plumbing system"*, Journal of Geosciences 55 (2010) 231–249.

[10] Mazhari S. A., Bea F., Amini S., et al., *"The Eocene Bimodal Piranshahr Massif of the*

igneous province of Transbaikalia (Russia)", Lithos 3-4 (2011) 845- 874.

[20] Andrić N., Vogt K., Matenco L., Cvetković C., et al, *"Variability of orogenic magmatism during Mediterranean-style continental collisions: A numerical modelling approach",* Gondwana Research 56 (2018) 119-134.

[21] Molina J.F., Scarrow J.H., Montero P.G., Bea F., *"High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic–ultrabasic magmatism of Central Iberia",* Contribution to Mineralogy and Petrology 158 (2009) 69-98.

[22] Driouch Y., Béziat D., Grégoire M., Laguenini F. et al, *"Clinopyroxene trace element compositions of cumulate mafic rocks and basalts from the Hercynian Moroccan Central Meseta: Petrogenetic implications",* Journal of African Earth Sciences 56 (2010) 97–106.

[23] Kim N.K., Choi S.H., *"Petrogenesis of Late Triassic ultramafic rocks from the Andong Ultramafic Complex, South Korea",* Lithos 264 (2016) 28–40.

[24] Tatsumi Y., Eggins S.M., *"Subduction Zone Magmatism: Frontiers in Earth Sciences. Blackwell Science",* Cambridge, Mass, USA (1995) 211 p.

[25] Dalton H.B., Scott J.M., Liu J., Waight T.E., et al, *"Diffusion-zoned pyroxenes in an isotopically heterogeneous mantle lithosphere beneath the Dunedin Volcanic Group, New Zealand, and their implications for intraplate alkaline magma sources",* Lithosphere 9 (2017) 463-475.

[26] Arzamastsev A.A., Arzamastsev L.V., Bea F., Montero P., *"Trace Elements in Minerals as Indicators of the Evolution of Alkaline Ultrabasic Dike Series: LA-ICP-MS Data for the Magmatic Provinces of Northeastern Fennoscandia and Germany",* Petrology 17 (2009) 46-72.

[DOI: 10.29252/ijcm.27.1.167]